

发电机定子绕组绝缘介质暂态 电场分布的场路分析法

刘 念¹, 谢 驰², 滕福生¹

(1. 四川大学 电气工程系, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 测控系, 四川 成都 610065)

摘要: 针对在厂站操作过电压冲击下的大型发电机, 建立一种暂态过电压的场路分析方法, 研究大型发电机的暂态过电压场路分析模型。通过仿真研究表明暂态过电压场路分析模型能够对定子绕组绝缘介质中暂态电场的分布状态进行分析, 搜索发电机内部可能突发绝缘事故的区域, 预测发电机内部可能发生绝缘事故的故障点, 提高大型发电机绝缘安全在线诊断的准确度。

关键词: 暂态过电压; 暂态场路分析; 过电压仿真

中图分类号: TM 31; TM 307^{+.1} **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)02-0001-04

0 引言

厂站操作过电压分析, 实际上是对一种快速暂态过电压的分析。它的波形极为复杂, 并以电磁波速度沿线路传播, 它可以从厂站高压断路器的触头分合处沿其两侧快速传播, 也即是在超高压开关站开关引起的操作过电压冲击波沿着大型发电机组方向和超高压输电线路末端 2 个方向迅速传播^[1]。以前, 大型发电机快速暂态过电压的安全分析, 均是在建立发电机暂态路模型后离线计算每次快速暂态过电压冲击波作用下的发电机定子绕组电位分布^[2-3]。

随着大型电站的机组容量增大, 大型发电机的安全运行日益重要, 需要在计算每次快速暂态过电压冲击波作用下的发电机定子绕组电位分布后, 进一步计算其对应的暂态电场分布, 最终对大型发电机组进行在线绝缘安全预测评估, 完成大型发电机快速暂态过电压的在线安全分析^[4-5]。

因此, 为了在线分析大型电站的操作过电压冲击波在大型发电机组内部的暂态电场强度分布状态, 本文将重点研究厂站操作过电压的大型发电机暂态场路综合分析的计算方法等内容。

1 暂态过电压的在线计算

厂站操作过电压发生在超高压输电线路(电压等级: 330 kV, 500 kV, 750 kV)、升压变压器、高压断路器、高压电缆和大型发电机组组成的一个大系统中, 对厂站网络模型, 建立如下网络节点电压方程:

$$Y_n U_n = J_n \quad (1)$$

$$Y_n = AYA^T, J_n = -AYU_g \quad (2)$$

其中, 系数矩阵 Y_n 称为厂站系统网络的节点导纳矩阵, 其矩阵元素由厂站各子网络模型(发电机网络模型、升压变压器网络模型等)中的电气参数(R, L, C)而定, 并与厂站网络拓扑结构有关。 A 为厂站系统网络模型结构的关联矩阵, A^T 是 A 的转置矩阵。当厂站系统中每次发生操作过电压时, 与系统网络模型结构有关的关联矩阵 A 将发生变化。 U_n 为系统网络模型中节点电压向量, 其中发电机网络模型中的节点电压数量占其绝大多数。 J_n 为系统网络节点电流源向量, 它由独立电压源的诺顿等效电流向量 AYU_g 表示。

在暂态过程计算中, 厂站网络模型节点编号顺序采用发电机网络模型节点编号优先, 其次为升压变压器网络模型节点编号, 然后为高压电缆网络模型等。因此, 厂站网络模型的总导纳矩阵 Y_n 是由发电机模型导纳矩阵、升压变压器模型导纳矩阵及高压电缆网络模型导纳矩阵等所组成, 即

$$Y_n = \begin{bmatrix} Y_G & 0 & 0 \\ 0 & Y_T & 0 \\ 0 & 0 & Y_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

对应于式(1), 则在 t 时刻的系统网络状态方程为

$$[Y][u(t)] = [i(t)] \quad (4)$$

式中 $[Y]$ 为节点导纳矩阵; $[u(t)]$ 为 t 时刻的节点电压列向量; $[i(t)]$ 为 t 时刻注入节点电流源列向量。

在求解厂站系统中, 可能某些节点电压是已知的, 其他节点电压是待求的, 特别是发电机绕组各节点上电压。根据矩阵分块原则, 可将式(4)分解为

$$[[Y_{AA}(t)][Y_{BB}(t)]] \begin{bmatrix} [U_A(t)] \\ [U_B(t)] \end{bmatrix} = [i(t)] \quad (5)$$

其中, A 组是待求节点电压部分, B 组是已知节点电压部分。从式(5)得待求节点电压为

$$[u_A(t)] = [Y_{AA}]^{-1}([i(t)] - [Y_{BB}(t)][u_B(t)]) \quad (6)$$

式(6)是在每一间隔时间计算大型水轮发电机绕组上各节点电压的求解公式,求解进程可以由 $t=0$ 开始, $t=\Delta t$, $t=2\Delta t$, ..., 直到 $t=t_{\text{stop}}$ 为止。只要厂站网络参数与结构不变,则矩阵 $[Y_{AA}][Y_{BB}]$ 也不变。但是,只要厂站网络发生变化,就需要对导纳矩阵加以修正。式(6)表达了 t 时刻厂站连环状网络中的节点电压与支路电流之间的网络关系。对电感支路与电容支路采取如下方式进行处理,以便提高在线计算的速度。图 1 为厂站连环状网络模型结构中的任意一个 π 型子单元,在 $i, i+1$ 节点处的对地电容支路上,有

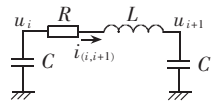


图 1 π 型子单元回路

Fig.1 Loop circuit of the basic element with the π -shape

$$i_{(i,C_g)} = C_g \frac{du_i}{dt}, \quad i_{(i+1,C_g)} = C_g \frac{du_{i+1}}{dt} \quad (7)$$

在单元线棒所处的支路上,有

$$u_i - u_{i+1} = R i_{(i,i+1)} + L \frac{di_{(i,i+1)}}{dt} \quad (8)$$

由于用 Δt 离散暂态过电压过程, Δt 很微小,对于

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{u(t) - u(t - \Delta t)}{\Delta t} = \frac{du}{dt} \quad (9)$$

可以采用差分(差商)公式近似替代微分,提高数据处理速度。因此,式(7)和式(8)中的微分均用差分格式代替,得:

$$\begin{aligned} i_{(i,C_g)}(t) &= C_g \frac{u_i(t) - u_i(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ i_{(i+1,C_g)}(t) &= C_g \frac{u_{i+1}(t) - u_{i+1}(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ i_{(i,i+1)}(t) &= \frac{\Delta t [u_i(t) - u_{i+1}(t)] + L i_{(i,i+1)}(t - \Delta t)}{L + R \Delta t} \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $u_i(t - \Delta t)$, $u_{i+1}(t - \Delta t)$ 为 $(t - \Delta t)$ 时刻的 $i, i+1$ 节点上的电位; $i_{(i,i+1)}(t - \Delta t)$ 为 $(t - \Delta t)$ 时刻 $(i, i+1)$ 单元线棒支路上的瞬态电流; Δt 为步长。

对图 1 网络电路中的 $i, i+1$ 相邻 2 节点,存在电流关系

$$\begin{aligned} i_{(i,i+1)}(t) &= i_{(i-1,i)}(t) - i_{(i,C_g)}(t) \\ i_{(i,i+1)}(t) &= i_{(i+1,C_g)}(t) + i_{(i+1,i+2)}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),就可以获取离散形式的节点网络方程组

$$\bar{A}u(t) = Bu(t - \Delta t) + Ci(t - \Delta t) \quad (12)$$

式(12)是一组时间上离散化的线性代数方程组,它可以用 $(t - \Delta t)$ 时刻的大型发电机绕组网络中的单元线棒支路电流和节点电压,计算出 t 时刻的绕组分布节点电位。 $\bar{A}$, B 矩阵中的元素将与厂站网络模型中的电阻、电容和电感参数有关,而 C 矩阵中的元素只与电阻、电感参数有关^[6-7]。 $u(t)$ 为待求节点电压向量,而 $u(t - \Delta t)$ 和 $i(t - \Delta t)$ 分别为 $(t - \Delta t)$ 时刻的节点电压向量和电感支路电流。

2 过电压的暂态电场计算

大型水轮发电机的定子绕组线棒安装在定子的铁芯槽内,并用环氧树脂云母合成绝缘材料(环氧粉云母绝缘)等填充。在厂站操作过电压冲击发电机过程中,发电机定子槽内的暂态电磁场可以由达朗贝尔方程表示

$$\begin{aligned} \nabla^2 A_m - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 A_m}{\partial t^2} &= -\mu \delta_c \\ \nabla^2 \varphi &= \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (13)$$

式中 A_m 为槽内向量磁位; φ 为槽内标量电位; δ_c 为电流密度; μ 和 ε 分别为槽内介质的导磁率和介电常数。

与式(13)相对应的暂态电场 $E(t)$ 为

$$E(t) = \nabla \varphi + \frac{\partial A_m}{\partial t} \quad (14)$$

由于发电机电磁结构以及电磁暂态过程比较复杂,采用解析方法还难以求解式(13)和(14)。实际上为计算这类暂态问题,可以采用离散暂态过程的时步长(Δt)数值计算方法。由于快速暂态过电压冲击波的波速(一般为 $150 \sim 300 \text{ m}/\mu\text{s}$),但仍比发电设备的尺寸大得多,发电机槽内暂态电场的场域尺寸比电磁波波长小得多,如将离散暂态过程时间 Δt 值取得极小,则对每一时刻瞬间,电场主要与介电系数 ε 有关,在每一个离散时刻的暂态电场都可以略去磁场变化引起的分量。另外,发电机定子线棒在槽内的长度比线棒截面或槽截面的长和宽都大得多,在计算槽内电场分布时,可以把实际的电机三维电场问题处理成二维电场问题,以便从整体上提高发电机暂态电场的在线分析计算速度。

对于厂站操作过电压冲击过程,首先计算出每个离散时刻 t_i 的发电机绕组线棒电压分布,其结果将为时步长的有限元(FEM)分析提供电场区域边界条件^[8]。下面对大型发电机定子槽内暂态电场问题进行时间离散研究。设在暂态过程中的 t_i 时刻,在不考虑发电机定子槽内介质的位移电流、槽内边界效应、线棒内集肤效应及铁芯齿部的涡流效应等,大型发电机槽内电场满足如下偏微分方程。

$$\begin{aligned} \Omega: \quad \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon \frac{\partial U_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon \frac{\partial U_i}{\partial y}) &= -\rho_i \\ L_1: \quad U_i|_{t=t_i} &= U_0 \\ L_2: \quad \varepsilon \frac{\partial U_i}{\partial n} \Big|_{t=t_i} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

其中 Ω 代表发电机定子某槽在轴向某位置处沿径向到槽截面 $1/2$ 的电场区域。

U_i 为槽内场域电位函数, ε 为槽内场域介电系数, ρ_i 为槽内场域中积累的电荷密度, L_1 和 L_2 围成场域边界,并具有时间 $t = t_i$ 瞬时的第 1 类边界条件

和第 2 类边界条件, L_1 边界由 $\overline{ABCD} + \overline{EF} + \overline{GHIJKL} + \overline{MNOPQR}$ 组成,第 2 类边界由 $\overline{AR} + \overline{ML} + \overline{GF}$ 组成,该 Ω 场域实际上由曲边区域所组成。

从泛函分析,式(15)可得其对应的条件变分问题为

$$\begin{aligned} \Omega: \quad F(U_i) &= \iint_{\Omega} [W(U_i) - \rho_i U_i] d\Omega \\ L_1: \quad U_i|_{t=t_i} &= U_0 \end{aligned} \tag{16}$$

为了数值计算槽内绝缘介质区域中任一点的电场强度,必须在每个单元 Ω_i 内构造电位的插值函数

$$U_i = \sum_{i=1}^N \alpha_i U_{ii} \tag{17}$$

式中 α_i 为形状函数,它与有限单元的网络拓扑信息有关; U_{ii} 为有限单元 Ω_i 场域内节点上的电位; N 为单元上的拓扑节点数目。

因此,式(16)能量泛函极值问题转化为能量函数极值问题:

$$\frac{\partial F(U_i)}{\partial U_{ii}} = \sum_{e=1}^M \frac{\partial F_e}{\partial U_{ii}} = 0 \tag{18}$$

即

$$\iint_{\Omega_e} \frac{\partial W_e(U_i)}{\partial U_{ii}} d\Omega - \iint_{\Omega_e} \rho_i \alpha_i d\Omega = 0 \tag{19}$$

其中

$$\frac{\partial W_e(U_i)}{\partial U_{ii}} = \frac{\partial W_e(U_i)}{\partial E_i^2} \frac{\partial E_i^2}{\partial U_{ii}} = \varepsilon \sum_{j=1}^N U_{ij} (\nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j) \tag{20}$$

而发电机槽内电场强度的大小是

$$\begin{aligned} E_i = \nabla U_i &= \sqrt{\left(\frac{\partial U_i}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial U_i}{\partial y}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N U_{ij} U_{ij} (\nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j)} \end{aligned} \tag{21}$$

因此,得有限元方法的单元矩阵系数为

$$\begin{aligned} S_{ij} &= \iint_{\Omega_e} \varepsilon (\nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j) d\Omega \\ T_{ij} &= \iint_{\Omega_e} \alpha_i \alpha_j d\Omega \end{aligned} \tag{22}$$

依次对槽内场域 Ω 中的 M 个有限单元 Ω_i 循环进行单元分析计算,并将每次计算结果 S_{ij} 和 T_{ij} 送入有限元数据库中,然后进行总体合成,生成有限元方程组。数学模型的矩阵形式为

$$\begin{aligned} [S][U_{ii}] &= [T][Q] \\ [U_{ii}] &= [U_{i1}, U_{i2}, U_{i3}, \dots, U_{iN}] \\ [Q] &= [\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_N] \end{aligned} \tag{23}$$

分析厂站操作过电压对大型发电机绝缘造成的危害程度,就需要计算与分析在操作过电压冲击暂态过程中发电机定子槽内绝缘介质的暂态电场场强 $E(t)$ 的大小及分布形态,采用计算机在线完成发电机定子槽内瞬态电场分布计算工作。

对大型发电机槽内耦合有限单元上在任意时刻的暂态电场 E_t 为

$$E_t = \nabla U_t = \nabla \left(\sum_{i=1}^6 \alpha_i U_{ii} \right) \tag{24}$$

则暂态电场 E_t 的大小为

$$E_t = |\nabla U_t| = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^6 \frac{\partial \alpha_i}{\partial x} U_{ii} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^6 \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} U_{ii} \right)^2} \tag{25}$$

对大型发电机定子某号槽内的某槽截面绝缘介质中任意一点 P 上的暂态场强 E_{tP} ,有

$$E_{tP}(x,y) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^6 \frac{\partial \alpha_i}{\partial x} U_{ii} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^6 \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} U_{ii} \right)^2} \Big|_{P(x,y)} \tag{26}$$

式中 $\partial \alpha_i / \partial x, \partial \alpha_i / \partial y$ 及 $U_{ii} (i=1,2,\dots,6)$ 的值由 FEM 数据库提供。

大型发电机定子槽内 P 点的暂态电场强度随操作冲击过程变化的变化率,是与操作过电压波形陡度相关的物理量,从数值分析上可用差分代替微分,则场强变化率为

$$E_{dtP} = \frac{dE_P(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E_P(t)}{\Delta t} = \frac{E_{tP}(t_i) - E_{tP}(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \tag{27}$$

3 操作过电压的暂态电场仿真

下面对某一大型水电站进行暂态场路综合分析的计算仿真。大型水电站,装机总容量为 330×10^4 kW,共 6 台机组,主要以 6 号水轮发电机投合 500 kV 输电线路为计算对象,如图 2 所示。

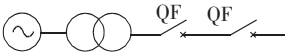


图 2 6 号发电机组投合 500 kV 输电线路

Fig.2 The sixth generator is closed to the practical power transmission line

同时,以 6 号发电机定子 1 号(1#)槽绝缘为代表,仿真计算操作冲击波进入 6 号发电机 A 相绕组首端元件后对第 1 号(1#)槽绝缘的冲击,由此完成大型发电机绝缘安全状态预测分析的仿真工作。首先,采用路模型计算对该大型水电站的开关站中高压断路器 QF 投合空载输电线路操作暂态过程进行仿真计算。图 3 仿真波形图,是在 $t = 20$ s 时刻投合空载输电线路仿真波形图。

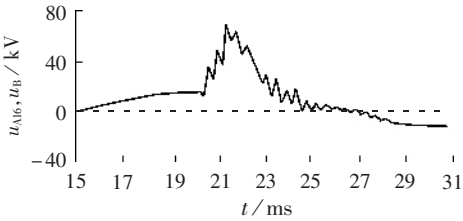


图 3 投合空载长线时 EMTF 仿真波形

Fig.3 The simulation waveform of switching on the no-load long transmission line

在图 3 中, A_{16} 为 6 号发电机定子 1 号槽上层线棒节点, B 为升压电力变压器低压侧节点。从图 3 可见, A_{16} 和 B 这 2 个节点的暂态电压波形几乎重合,仿真表明超高压侧的操作过电压将通过升压变压器传递到低压侧,几乎无畸变地进入发电机内部。另外,从 EMTF 仿真波形可知,投合空载长线时要

特别引起重视,这种操作会产生电压峰值高于切断空载长线时的操作过电压冲击波,操作过电压峰值可达 $4 \sim 5 \text{ p.u.}$ [9-10]。

对于操作暂态过程的每一时刻 $n, \Delta t$, 采用暂态电场模型, 对6号发电机定子1号槽内绝缘区域电场进行仿真计算。将1号槽内瞬态电场的暂态过程由时间步长 Δt 离散化后由FEM程序仿真计算, 取离散化时间步长 $\Delta t = 200 \mu\text{s}$ 。然后, 采用电场FEM程序对操作暂态全过程进行发电机内部暂态电场的分析计算, 从而获得大型发电机绝缘安全状态预测分析所需的暂态场强实时数据。本文暂态时刻 $t_{k+1} = 0.0212 \text{ s}$ 进行FEM计算。图4显示出在 $t_{k+1} = 0.0212 \text{ s}$ 时刻6号发电机定子1号槽内超强暂态电场实时分布的图像信息。

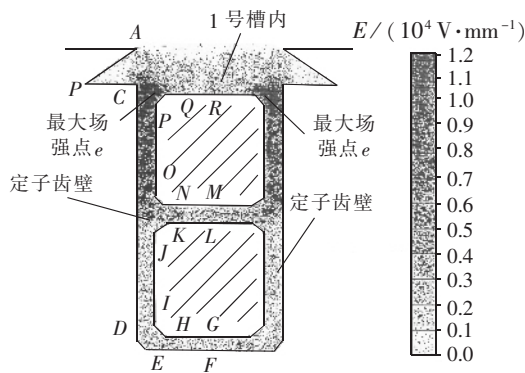


图4 $t_{k+1} = 0.0212 \text{ s}$ 时刻1号槽内暂态电场分布的图像

Fig.4 Transient electric field image inside the first slot at $t_{k+1} = 0.0212 \text{ s}$

通过场路综合分析, 仿真了超高压输电线路上的操作冲击波对该大型水电站大型发电机的入侵, 并深入到大型水轮发电机内部, 跟踪操作冲击波在6号发电机定子1号槽内绝缘介质中的实时分布, 完成对可能突发绝缘事故的区域进行搜索与监视, 预测诊断可能会发生绝缘事故的隐患点。结合场路仿真分析结果搜索发现在上层线棒表面与齿壁之间处将形成突发绝缘事故的区域, 并通过搜索锁定最大电场强度 $E_{\max}(t)$ 就出现在该区域中。因此, 分析诊断在紧靠上层线棒圆角处存在绝缘击穿隐患, 在上层线棒表面与齿壁之间也存在绝缘击穿或损伤隐患, 且会在定子槽口诱发局部放电现象。从图3可看出超强暂态电场将在6号水轮发电机定子槽绝缘介质内部造成的冲击危害程度。

4 结语

为了预测大型发电机组在厂站操作过电压冲击下的绝缘安全程度, 在完成对大型水轮发电机内部绕组离散时刻的电位计算基础上, 进一步计算出定子槽内绝缘介质中暂态电场强度显得十分重要。本文针对大型发电机内部受厂站操作过电压冲击问题, 研究了暂态过电压场路综合分析方法。

操作过电压冲击波能够通过变压器传递到发电机的定子绕组出线端, 过电压冲击波会涌入发电机内部, 直接对发电机定子绕组构成威胁, 但是仅仅用波形分析是无法分析发电机内部绝缘介质的安全状况。由于在运行过程中, 直接对发电机定子绕组上的过电压冲击波实施在线监测是相当困难的, 也是大型发电机结构状态和运行安全所不能允许的。

参考文献:

- [1] DICK E P, GUPTA B K. Review of generator surge coordination including generator breakers[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1988, 3(2): 599-605.
- [2] LI Zhe-sheng, KIRTLEY J L. Switching surge voltage distribution in super-conducting generators[J]. **IEEE Trans. on PAS**, 1985, 104(8): 2190-2197.
- [3] FUNABASHI T. Generator modeling for transformer transfer voltage study[J]. **IEEE Trans. on Energy Conversion**, 1999, 14(4): 1193-1198.
- [4] COMICK K J. Computer simulation of three-phase prestriking transients in cable-connected motor systems[J]. **Proc. IEE, Part B**, 1991, 138(3): 105-114.
- [5] COMICK K J, GUARDADO J L. Inter-turn voltages in machine windings evaluated from on-site test results and computer simulation[J]. **Proc. IEE, Part B**, 1992, 139(3): 238-244.
- [6] GUARDADO J L, COMICK K J. Calculation of machine winding electrical parameters at high frequencies for switching transient studies[J]. **IEEE Trans. on Energy Conversion**, 1996, 11(1): 33-40.
- [7] GUARDADO J L, COMICK K J. A three-shape model for surge distribution studies in electric machines[J]. **IEEE Trans. on Energy Conversion**, 1997, 12(1): 24-31.
- [8] RHUDY R G, OWEN E L. Voltage distribution among the coil and turns of a form wound AC rotating machine exposed to impulse voltage[J]. **IEEE Trans. on Energy Conversion**, 1986, 2(2): 50-58.
- [9] METWALL A. Simulation of the impulse response of electrical machines[J]. **IEEE Trans. on Energy Conversion**, 1999, 4(4): 861-866.
- [10] NARANG A, GUPTA B K. Measurement and analysis of surge distribution in motor stator winding[J]. **IEEE Trans. on Energy Conversion**, 1989, 14(1): 126-134.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

刘念(1956-), 男, 重庆人, 教授, 博士, 研究方向为电力系统安全监控与故障诊断新技术(E-mail: liunianww@163.com);

谢驰(1956-), 女, 四川自贡人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为测控技术与智能仪器;

滕福生(1929-), 男, 福建福州人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统安全监控和安全分析新理论。

Field-circuit analysis method of transient electric field in stator winding insulation of generators

LIU Nian¹, XIE Chi², TENG Fu-sheng¹

(1.Department of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2.Department of Test and Control Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: For the large generator stricken by the operational over-voltage in power stations, a field-circuit analysis method of transient over-voltage is presented to study the transient over-voltage field-circuit model of large generator. The simulative research shows that, the transient field-circuit analysis model can analyze the transient field distribution in the stator winding insulator, predict possible insulation fault points and detect possible insulation fault domains in generator, which increases the online diagnosis correctness of large generator insulation safety.

Key words: transient over-voltage; transient field-circuit analysis; over-voltage simulation